中国生态农业学报 2017 年 3 月 第 25 卷 第 3 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Mar. 2017, 25(3): 373−380

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160669

李阳阳, 费聪, 崔静, 王开勇, 马富裕, 樊华. 滴灌甜菜对糖分积累期水分亏缺的生理响应[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(3): 373−380
Li Y Y, Fei C, Cui J, Wang K Y, Ma F Y, Fan H. Physiological response of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) to water deficit at sugar accumulation stage under drip irrigation[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(3): 373−380

滴灌甜菜对糖分积累期水分亏缺的生理响应*

李阳阳, 费 聪, 崔 静, 王开勇, 马富裕**, 樊 华**

(石河子大学农学院 石河子 832003)

摘 要: 滴灌条件下, 于甜菜糖分积累期设置 0~40 cm 土层含水量下限分别为 70%、50%、30%田间持水量的 3 种土壤水分处理, 从叶片光合特性、水分胁迫指数、恢复度、产量及产糖量方面分析复水前后甜菜的生理响应, 明确甜菜糖分积累期可忍受最大程度的水分亏缺下限。结果表明: 30%田间持水量处理甜菜产量及产糖量都显著高于 70%田间持水量和 50%田间持水量, 分别比 70%田间持水量提高 51.34%和 51.47%, 比 50%田间持水量提高 36.72%和 39.48%。复水前 30%田间持水量处理的甜菜叶片净光合速率显著低于其他处理, 复水后处理间的叶片净光合速率的差异随时间推移减小, 胞间 CO_2 浓度表现出相反的趋势。当土壤水分下降到既定下限时, 叶片脯氨酸和可溶性糖含量变化最为灵敏, 且与缺水程度呈正相关; 复水后叶片的细胞膜透性、抗氧化防御体系以及渗透调节物质均产生了正补偿效应, 表现为丙二醛含量降低, 抗氧化性酶活性增强, 控制渗透调节的脯氨酸和可溶性糖含量增加。因此, 在糖分积累期, 土壤含水量下降至田间持水量的 30%时进行补充灌溉, 在一定程度上补偿水分亏缺对甜菜产生的负面影响, 实现干旱区滴灌甜菜节水高产优质的目的。

关键词: 甜菜; 水分亏缺; 复水; 补偿效应; 生理响应; 水分胁迫指数; 产量
中图分类号: S-3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2017)03-0373-08

Physiological response of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) to water deficit at sugar accumulation stage under drip irrigation*

LI Yangyang, FEI Cong, CUI Jing, WANG Kaiyong, MA Fuyu**, FAN Hua**

(Agronomy College, Shihezi University, Shihezi 832003, China)

Abstract: Understanding the effects of water deficit on the physiological characteristics of sugar beet is essential for the determination of the minimum soil water content during sugar accumulation stage. Thus a field experiment was conducted to study the changes in leaf photosynthetic characteristics, water stress index, recovery degree, yield and technological sugar yield under drought resistance and rehydration cultivation. The study included three soil water content levels in the 0–40 cm depth — 70% of field capacity (T1), 50% of field capacity (T2) and 30% of field capacity (T3). The results showed that the yield and technological sugar yield under T3 were significantly higher than those under T1 and T2 by 51.34%, 51.47%, and 36.72%, 39.48%, respectively. Leaf proline and soluble sugar contents were sensitive to water deficit before rehydration.

* 国家自然科学基金项目(31260299)、教育部科学技术研究重点项目(212201)、新疆生产建设兵团博士基金项目(2014BB012)和石河子大学杰出青年科技人才培育计划(2015ZRKXJQ03)资助
** 通讯作者: 马富裕, 主要从事作物水分生理与精准农业信息化研究, E-mail: mfy-agr@shzu.edu.cn; 樊华, 主要从事甜菜生理生态方面研究, E-mail: fanhua@shzu.edu.cn
李阳阳, 研究方向为作物生理生态。E-mail: 643831266@qq.com
收稿日期: 2016-07-30 接受日期: 2016-12-03

* This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (31260299), the Key Project of Chinese Ministry of Education (212201), the Doctoral Program of Higher Education of Xinjiang Production and Construction Corps (2014BB012), and the Training Program of Distinguished Young Scientists of Shihezi University (2015ZRKXJQ03).
** Corresponding authors: MA Fuyu, E-mail: mfy-agr@shzu.edu.cn; FAN Hua, E-mail: fanhua@shzu.edu.cn
Received Jul. 30, 2016; accepted Dec. 3, 2016

Moreover, both leaf proline and soluble sugar contents were positive correlated with the degree of water deficit. Rehydration after water stress showed positive compensation effect on membrane permeability, antioxidant enzyme activities and osmotic adjustment substances contents of sugar beet. The enhancements were observed in leaf malondiadehyde content, peroxidased and catlase enzyme activities, proline and soluble sugar contents which favored increased osmotic adjustment. Therefore, prompt supplemental irrigation was needed when soil water content dropped to 30% of field capacity during sugar accumulation stage, which had a compensation effect on sugar beet under water deficit cultivation. It was helpful to work toward high yield and quality of sugar beet under drip irrigation in arid areas.

Keywords: Sugar beet; Water deficit; Rehydration; Compensation effect; Physiological response; Water stress index; Yield

西北干旱区是我国农业重要产区，水资源短缺已成为严重影响干旱区作物产量和品质的瓶颈问题。在作物非水分敏感期进行适度水分亏缺，可以在产量和生物量等方面接近或超出一直充分供水处理的产量水平，达到高产与节水的双重目标。前人研究表明，糖分积累期对水分敏感程度下降，此时水分过量会降低甜菜含糖量[1-2]。同时，水分亏缺对与作物产量形成密切相关的各生理过程的影响程度不同[3-4]。作物受到水分胁迫时，加剧或引发膜脂过氧化作用，导致生物膜受损，阻断物质能量交换以及信息传递，从而影响植物生理生化代谢和生长发育过程[5-6]；渗透调节能力是植物抗逆性的重要特征，也是逆境胁迫补偿效应产生的基础[7]；抗氧化系统能主动适应调节维持植物的正常生理功能，与植物的抗逆性密切相关[8-9]。此外，光合作用、气孔导度、蒸腾作用等植物气体交换参数对水分胁迫也较为敏感[10-11]。已有研究表明，甜菜叶丛生长期中度缺水处理(50%田间持水量)下酶促活性氧清除系统以CAT 反应最为灵敏[12]。

目前，以水肥高投入为代价的滴灌甜菜高产田在新疆不断涌现，如何立足当地独特的气候优势和节水滴灌技术，在减少水分投入的条件下产出更多优质白糖，提质增效是干旱区滴灌甜菜生产当前亟待解决的问题。为此，本研究选取甜菜非水分敏感期开展试验，利用甜菜抗旱性较强的特性，从生理生化角度分析糖分积累期水分亏缺及复水对滴灌甜菜产量的影响，明确该生育时期控水下限，为进一步提高干旱区滴灌甜菜水分利用效率提供参考依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

试验于 2014 年 4—10 月和 2015 年 4—10 月在新疆石河子大学农学院实验站(45°19′N，86°03′E)进行，海拔 450.8 m，年平均气温 7.5~8.2 ℃，日照时数 2 318~2 732 h，无霜期 147~191 d，年降雨量 180~270 mm，年蒸发量 1 000~1 500 mm，属典型的温带大陆性气候。试验区土壤为灌溉灰漠土，质地为重壤，耕层土壤全氮 0.89 $g\cdot kg^{-1}$，速效磷 0.022 $g\cdot kg^{-1}$，速效钾 0.249 $g\cdot kg^{-1}$，碱解氮 0.058 $g\cdot kg^{-1}$，pH 7.3，土壤有机质 13.25 $g\cdot kg^{-1}$。耕层土壤容重为 1.6 $g\cdot cm^{-3}$，田间持水量为 19%(质量含水量)，地下水埋深大于 5 m。

1.2 试验设计

试验材料为甜菜(*Beta vulgaris* L.)，品种为‘Beta356’。在甜菜糖分积累期(出苗后 105 d 至 130 d)设置了轻度亏缺(70%田间持水量，T1)、中度亏缺(50%田间持水量，T2)、重度亏缺(30%田间持水量，T3)3 种土壤水分控制下限。当测定的土壤含水量降到设定范围内时，对该小区进行灌水至饱和含水量。试验过程中 3 个处理的出苗水没有差异，苗期不灌水(蹲苗)，3 个处理均从出苗后 40 d 开始灌水，出苗 40 d 后至 105 d 之间保证 3 个处理土壤水分下限均为田间持水量的 70%(即 3 个处理降到田间持水量 70%时开始灌水，灌至饱和含水量，如此过程反复进行)，至甜菜进入糖分积累期(出苗后 105~130 d)开始进行 3 种程度的水分亏缺，到达亏缺下限后复水至饱和含水量。130 d 之后收获并测产。灌水量由灌水定额计算公式确定[13]，计算公式为:

$$m = 10\rho_b H\left(\beta_i - \beta_j\right) \quad (1)$$

式中：m 为灌水量(mm)；ρ_b 为该时段土壤计划湿润层内土壤容重($g\cdot cm^{-3}$)；H 为计划湿润层深度(cm)，本试验计划湿润层深度为 40 cm；β_i 为目标含水量(田间持水量乘以目标相对含水量)；β_j 为灌前土壤含水量。灌水量由水表记录。由于在实际操作过程中很难控制灌水下限，所以每个处理均设 1 个 5%范围值(占田间持水量的百分比)。

采用膜下滴灌的方式种植甜菜，株行距配置方式为 20 cm ×50 cm。滴灌带配置模式为“1 管 2”模式，即 1 条毛管控制 2 行甜菜。小区面积 4 m×12 m，小区间设 1 m 隔离区，随机区组排列，3 次重复。为了保证出苗，在播种后均灌水至土壤饱和含水量，于出苗后 105 d 通过控制灌水量开始处理，出苗后 130 d 糖分积累期结束。

1.3 测试项目与方法

于糖分积累期每日上午 9:00—10:00 用 watermark (Irrometer Company, Riverside, CA)水分传感器分别监测 20 cm、40 cm、60 cm 处土壤墒情。该值可以反映土壤含水量状况, 测定范围为 0~–2 bar(0~–200 kPa), 0 bar 表示土壤处于饱和含水量状态, –2 bar 表示土壤极度干旱。

在各处理复水历时 0 h、24 h、48 h、72 h, 每个重复选取完全展开的甜菜叶片, 于上午 10:00—12:00 使用 Li-6400(Li-Cor Inc., Lincolin, USA)便携式光合作用系统测定气体交换参数, 然后进行破坏性取样, 用剪刀剪取相应叶片和地下部块根, 一部分材料立刻带回实验室测定丙二醛(MDA)含量和电导率, 另一部分材料迅速用锡箔纸包裹至于液氮罐内, 用于过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)的活性, 以及脯氨酸(Pro)和可溶性糖含量的分析。出苗后 130 d 块根膨大期结束后测定产量和含糖量。

产糖量=单株产量×含糖量×公顷理论株数×出苗率　　(2)

生理指标的测定方法参考[14-15]: MDA 含量用硫代巴比妥酸法, 电导率采用电导率仪法, POD 活性用愈创木酚法, CAT 活性采用紫外吸收法, Pro 含量用磺基水杨酸法, 可溶性糖用蒽酮比色法测定。

水分胁迫指数(I_{ws})反映胁迫条件下各指标偏离对照的程度, 可用来反映幼苗受水分胁迫的影响程度, 计算公式如下[16]:

$$\mathrm{WSI}=1-X_{ws}/X_{ck} \quad (3)$$

式中: WSI(water stress index)为水分胁迫下某指标的水分胁迫指数, W_{xs} 为水分胁迫下某生长时期某指标的测定值, X_{ck} 为对照相应指标的测定值。如某指标变化与植物抗旱性成负相关, 则取 X_{ws}/X_{ck} 倒数计算。WSI 值变化在 0~1 之间, 其值越大, 表明该指标受水分胁迫的影响越大。

恢复度(R_d)是指水分胁迫解除后, 各指标恢复情况与对照的贴近度。用下列公式计算[16]:

$$R_d=X_r/X_{CK} \quad (4)$$

式中: R_d 为水分胁迫解除后某指标的恢复度, X_r 为水分胁迫解除后某指标测定值, X_{CK} 为对照(70%田间持水量处理)相应指标的测定值。如某指标变化与植物抗旱性成负相关, 则取 X_r/X_{CK} 的倒数计算。R_d 变化在 0~1 之间, 其值越大, 表明胁迫解除后该指标与对照值的贴近度越高, 恢复情况越好。

1.4 数据处理

用 SPSS 12.0 软件进行数据的统计分析, 用单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)比较不同数据组间的差异($P<0.05$)。采用 Oringin 8.5 软件做图。

2 结果与分析

2.1 不同水分处理耕层土壤水势分布

两年试验中糖分积累期(出苗后 105~130 d) 0~40 cm 土层平均土壤水势为–199~–5 kPa, 且在轻度水分亏缺处理(T1)下波动幅度较小, 中度水分处理(T2)次之, 重度水分处理(T3)波动剧烈。土壤水势随土层深度的增加略有上升, 与 20~40 cm 土层相比, 土壤水势在 0~20 cm 土层有所降低, 在 40~60 cm 土层略有增加, 这可能与 watermark 水分传感器埋设的位置有关(图 1)。

2.2 水分处理对滴灌甜菜气体交换参数的影响

不同土壤水分条件下甜菜气体交换参数变化各异(图 2), 灌水前后 T3 处理的叶片净光合速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度和蒸腾速率均显著低于 T1 和 T2 处理, 这可能与 T3 处理下土壤水分过低引起的叶片不可恢复性损伤有关。两年试验中 T1 和 T2 处理灌水前后叶片气体交换参数表现不同, 2014 年灌水前的叶片净光合速率和蒸腾速率表现为 T2>T1, 气孔导度和胞间 CO_2 浓度表现为 T1>T2, 灌水后的叶片净光合速率、气孔导度和蒸腾速率表现为 T1>T2, 胞间 CO_2 浓度表现为 T2>T1。2015 年灌水前的叶片净光合速率和气孔导度表现为 T1>T2, 蒸腾速率和胞间 CO_2 浓度表现为 T2>T1, 灌水后的叶片净光合速率、气孔导度和蒸腾速率表现为 T2>T1, 胞间 CO_2 浓度表现为 T1>T2。尽管两年间 T1 和 T2 处理灌水前后叶片气体交换参数表现不同, 但叶片净光合速率与胞间 CO_2 浓度均呈现相反的变化趋势, 表明 T2 处理甜菜叶片生长可能受到非气孔因素的限制[17]。

2.3 不同水分处理下滴灌甜菜生理指标的水分胁迫指数和恢复度比较

不同土壤水分条件下甜菜叶片和块根水分胁迫指数和恢复度各异(表 1)。相较于轻度水分亏缺, 中度水分亏缺对甜菜叶片和块根的丙二醛含量、相对电导率、过氧化物酶活性、脯氨酸含量的胁迫较大, 对过氧化氢酶活性胁迫较小, 而重度缺水对甜菜叶片和块根中脯氨酸和可溶性糖含量的胁迫最大, 对过氧化氢酶活性带来的胁迫最小。复水后, 各生理指标均有不同程度的恢复, 叶片和块根的恢复程度也不尽相同, 其中相对电导率和过氧化物酶叶片恢复度高于块根恢复度; 过氧化氢酶、脯氨酸和可溶

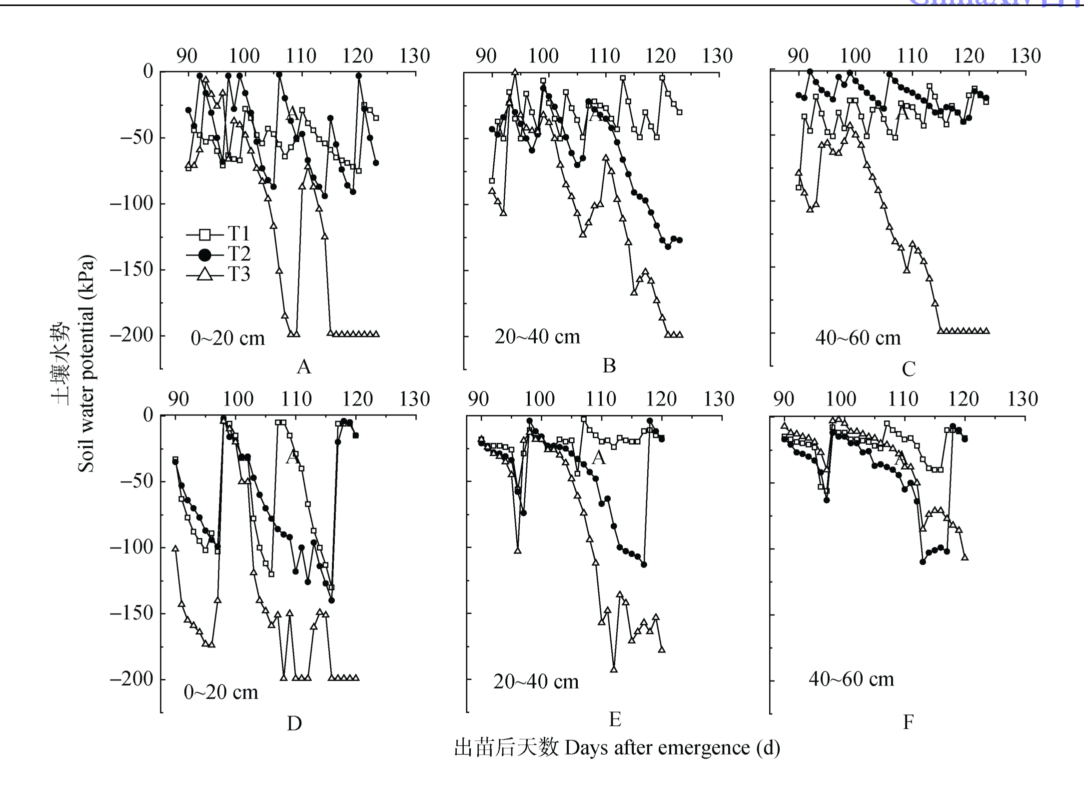


图 1 2014 年和 2015 年不同土壤水分处理下 0~60 cm 土层水势变化

Fig. 1 Variation of water potentials in 0–60 cm soil under different soil water conditions in 2014 and 2015

T1: 轻度亏缺, 土壤含水量下限为 70%田间持水量; T2: 中度亏缺, 土壤含水量下限为 50%田间持水量; T3: 重度亏缺, 土壤含水量下限为 30%田间持水量。甜菜糖分积累期(出苗后 105~130 d)开始进行 3 种程度的水分亏缺处理, 到达亏缺下限后复水至饱和含水量。A-C 代表 2014 年土壤水分变化; D-F 代表 2015 年土壤水分变化。T1: mild water deficit, lower limit of soil moisture is 70% field capacity; T2: moderate water deficit, lower limit of soil moisture is 50% field capacity; T3: severe water deficit, lower limit of soil moisture is 30% field capacity. Three treatments were conducted at sugar accumulation stage of sugar beet (105 to 130 days after seedling emergence), once the soil water got the lower limit, it was recovery to saturate through irrigation. Figure A to C show soil water conditions in 2014; figure D to F show soil water conditions in 2015.

性糖叶片的恢复度小于块根恢复度。叶片丙二醛、相对电导率、过氧化物酶以及脯氨酸的恢复度大于 1, 表明复水后甜菜叶片的细胞膜透性、抗氧化防御体系以及渗透调节物质均产生了正补偿效应。

2.4 不同水分处理下滴灌甜菜产量性状方差分析

两年的产量方差分析表明(表 2), 3 种土壤水分条件下的甜菜块根产量和产糖量差异显著, 均随着土壤控水下限的降低而升高, 具体表现为 T3>T2>T1, 其中 T3 处理的块根产量和产糖量分别比 T1 和 T2 处理增加了 51.34%和 51.47%, 36.72%和 39.48%。处理间的块根含糖量差异不显著, 两年平均值表现为 T3>T2>T1。

3 讨论

糖分积累期甜菜根叶生长接近停止, 干物质由地上部向根部转移, 以蔗糖形式蓄积在根部, 因此对于水分的需求较叶丛快速生长期和块根膨大期小, 过量的水分反而使甜菜含糖率下降[18]。侯振安等[1]的研究表明, 叶丛快速生长期充分供水, 后期限制供水可增加甜菜的块根含糖率与总产糖量, 提高水分利用率。陈彦云等[17]指出不同灌水时期和灌溉量对甜菜产质量的影响不同, 充分灌溉在增产的同时降低了含糖率, 且灌溉时间越迟, 频率越高, 甜菜的含糖率递减的越多。本研究结果显示, 30%田间持水量处理甜菜产量及产糖量分别比 70%田间持水量提高了 51.34%和 51.47%, 比 50%田间持水量提高了 36.72%和 39.48%。因此, 在甜菜糖分积累期, 当土壤含水量下降至田间持水量的 30%时进行补充灌溉, 可以达到节水高产优质的目的。

植物受到水分胁迫时往往通过一系列生理生态变化来应对[19-20], 如生长速度与生物量的分配形式, 水势平衡, 蒸腾速率以及酶活性的改变等[19,20-23]。叶丛生长期甜菜能够通过调节光合速率、细胞膜透性、保护性酶活性以及渗透物质等生理生化变化来适应水分胁迫[12]。本研究结果显示, 糖分积累期甜菜脯氨酸和可溶性糖的水分胁迫指数变化较为灵敏, 复水后甜菜叶片丙二醛、相对电导率、过氧化物酶以及脯氨酸的恢复度大于 1, 表明糖分积累期轻度、中度和重度水分亏缺复水后甜菜叶片的细胞膜透性、抗氧化防御体系以及渗透调节物质均产生了正补偿效应。

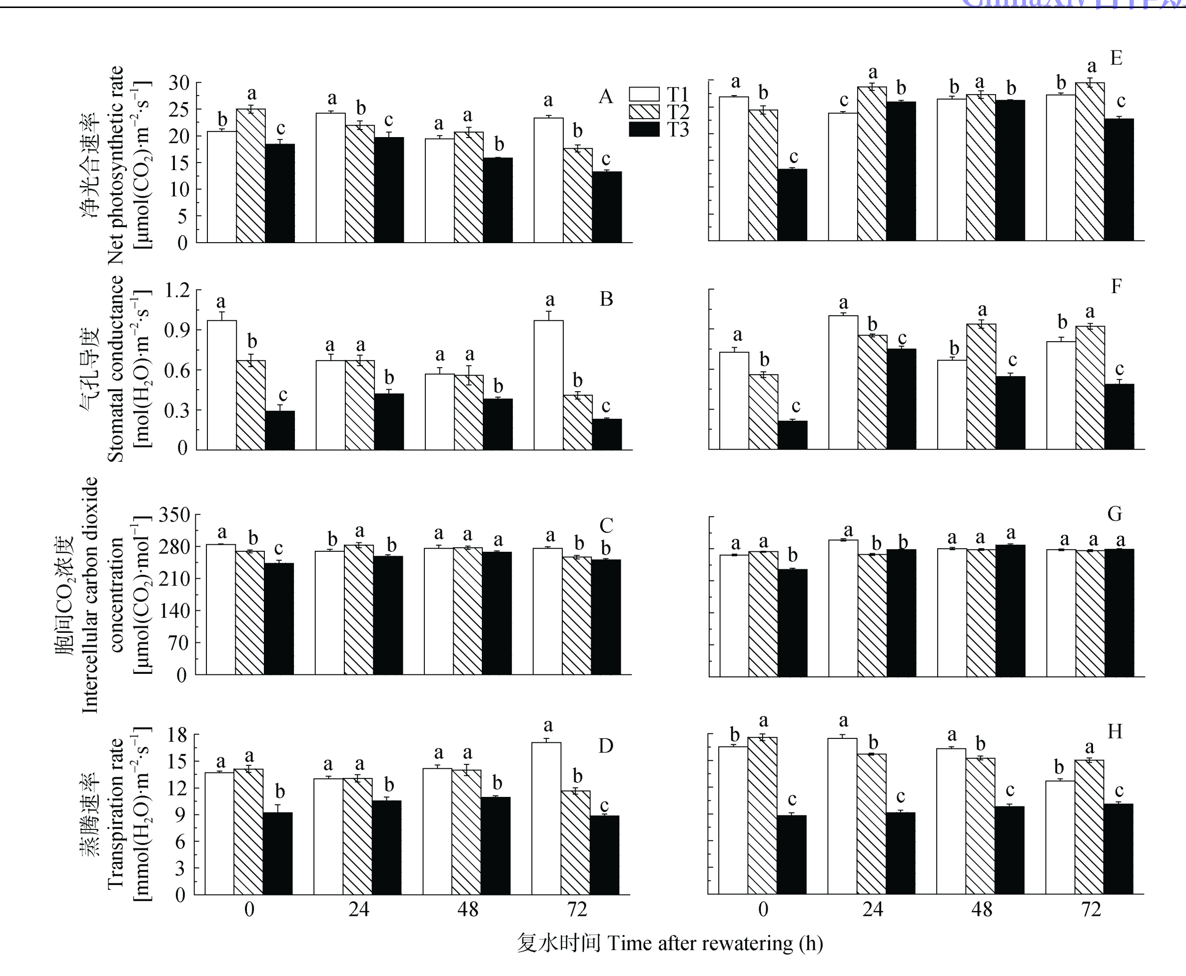


图 2　不同土壤水分处理后甜菜叶片光合特性比较

Fig. 2　Photosynthetic characteristics of sugar beet leaf after treatments of different soil water conditions

T1：轻度亏缺，土壤含水量下限为 70%田间持水量；T2：中度亏缺，土壤含水量下限为 50%田间持水量；T3：重度亏缺，土壤含水量下限为 30%田间持水量。甜菜糖分积累期(出苗后 105~130 d)开始进行 3 种程度的水分亏缺处理，到达亏缺下限后复水至饱和含水量。A-D 代表 2014 年光合特性变化；E-H 代表 2015 年光合特性变化。T1: mild water deficit, lower limit of soil moisture is 70% field capacity; T2: moderate water deficit, lower limit of soil moisture is 50% field capacity; T3: severe water deficit, lower limit of soil moisture is 30% field capacity. Three treatments were conducted at sugar accumulation stage of sugar beet (105 to 130 days after seedling emergence), once the soil water got the lower limit, it was recovery to saturate through irrigation. Figure A to D show photosynthetic characteristics in 2014; figure E to H show photosynthetic characteristics in 2015.

表 1　中度(T2)和重度(T3)水分亏缺下滴灌甜菜水分胁迫指数和复水后不同时间恢复度(R_d)的比较

Table 1　Water stress indexes and recovery degrees (R_d) at different times after water recovery of sugar beet under moderate (T2) and severe (T3) water deficit conditions

指标 Index	处理 Treatment	叶片 Leaf				块根 Beet			
		水分胁迫指数 Water stress index	R_d			水分胁迫指数 Water stress index	R_d		
			24 h	48 h	72 h		24 h	48 h	72 h
丙二醛 Malondiadehyde	T2	0.30	1.03	0.13	1.15				
	T3	0.17	1.17	1.09	1.30				
相对电导率 Relative conductivity	T2	0.27	1.14	1.04	1.10	0.27	0.82	1.16	0.74
	T3	0.43	0.93	1.00	1.03	0.40	0.81	1.01	0.96
过氧化物酶 Peroxidase	T2	0.35	1.22	0.74	1.57	0.48	0.07	0.55	1.13
	T3	0.01	1.20	0.76	0.74	0.36	0.17	0.17	0.87
过氧化氢酶 Catalase	T2	0.03	0.65	1.71	0.55	0.05	1.71	0.50	0.71
	T3	0.08	0.46	1.01	0.58	0.02	1.19	0.73	1.07
脯氨酸 Proline	T2	0.31	1.5	0.16	1.20	0.16	1.69	0.23	2.30
	T3	0.71	1.08	0.03	1.57	0.34	1.21	0.11	6.46
可溶性糖 Soluble sugar	T2	0.05	0.08	0.82	0.98	0.05	0.10	0.98	1.03
	T3	0.45	0.69	1.01	0.94	0.41	0.98	0.97	1.03

表 2 不同土壤水分处理下甜菜产量和产糖量

Table 2 Yield and sugar yield of sugar beet under different soil water conditions

年份 Year	处理 Treatment	产量 Yield (×10^3 kg·hm^{-2})	相对产量 Relative yield (%)	含糖量 Sugar content (%)	相对含糖量 Relative sugar content (%)	产糖量 Technological sugar yield (×10^3 kg·hm^{-2})	相对产糖量 Relative technological sugar yield (%)
2014	T1	80.73b	100.00	13.64a	100.00	11.01b	100.00
	T2	81.11b	100.47	12.03a	88.20	9.76b	88.65
	T3	126.56a	156.77	13.03a	95.53	16.49a	149.77
2015	T1	52.79c	100.00	14.72b	100.00	8.77b	100.00
	T2	66.89b	126.71	17.01a	115.56	11.72a	133.64
	T3	75.78a	143.55	16.59a	112.70	13.47a	153.59
T1		66.76c	100.00	14.18a	100.00	9.89b	100.00
T2		74.00b	110.84	14.52a	102.40	10.74b	108.59
T3		101.17a	151.54	14.81a	104.44	14.98a	151.47
2014		96.13a		12.90		12.42	
2015		65.15b		16.11		11.32	
年份 Year (Y)		**		ns		ns	
处理 Treatment (T)		*		ns		*	
Y × T		ns		ns		ns	

T1: 轻度亏缺, 土壤含水量下限为 70%田间持水量; T2: 中度亏缺, 土壤含水量下限为 50%田间持水量; T3: 重度亏缺, 土壤含水量下限为 30%田间持水量。甜菜糖分积累期(出苗后 105~130 d)开始进行 3 种程度的水分亏缺处理, 到达亏缺下限后复水至饱和含水量。不同小写字母表示差异显著(P<0.05); **、*和 ns 分别表示 P<0.01、P<0.05 水平显著和不显著。T1: lower limit of soil moisture is 70% field capacity; T2: lower limit of soil moisture is 50% field capacity; T3: lower limit of soil moisture is 30% field capacity. Three treatments were conducted at sugar accumulation stage of sugar beet (105 to 130 days after seedling emergence), once the soil water got the lower limit, it was recovery to saturate through irrigation. Different small letters show significant difference at 0.05 level. **, *, and ns mean significant difference at 0.01, 0.05 level and not significant, respectively.

水分亏缺影响作物光合生理过程, 可使作物净光合速率和蒸腾速率下降, 叶绿素含量减少, 引起活性氧、双氧水、羟自由基积累, 它们会对光合膜产生损伤, 继而影响光合作用的各个过程。有研究表明水分亏缺后复水对作物光合速率具有超补偿效应, 对光合产物具有超补偿积累, 有利于光合产物运转和分配[24]。叶片净光合速率、蒸腾速率、气孔导度及产量均随干旱胁迫程度增加而降低[25]。本研究结果表明, 重度水分亏缺条件甜菜叶片净光合速率显著下降。净光合速率随复水时间增加逐渐降低, 且处理间胞间 CO_2 浓度与其他参数呈现相反的变化趋势, 表明水分胁迫后可能存在叶片新陈代谢过程受阻, 如何从叶片气孔数、气孔形态、叶绿体解剖结构及其超微结构方面进一步阐明土壤水分与甜菜叶片生长以及块根糖分积累的关系, 是需要继续开展的工作。

4 结论

甜菜在糖分积累期可以接受 30%田间持水量的水分亏缺, 该处理下甜菜产量及产糖量最高, 分别比 70%田间持水量提高了 51.34%和 51.47%, 比 50%田间持水量提高了 36.72%和 39.48%。甜菜生理过程中脯氨酸以及可溶性糖含量对水分亏缺的响应最灵敏, 且与缺水程度呈正相关, 可以作为监测甜菜水分亏缺状况的指标。复水后甜菜叶片的细胞膜透性、抗氧化防御体系以及渗透调节物质均产生了一定正补偿效应。因此, 在糖分积累期, 当土壤含水量下降至田间持水量的 30%时进行补充灌溉, 可以实现干旱区滴灌甜菜节水高产优质的目的。

参考文献 References

[1] 侯振安, 刘日明, 朱继正, 等. 不同灌水量对甜菜生长及糖分积累影响的研究[J]. 中国甜菜糖业, 1999(6): 2–6
Hou Z A, Liu R M, Zhu J Z, et al. Effect of irrigation water amount to the sugarbeet growth and sugar accumulation[J]. China Beet & Sugar, 1999(6): 2–6
[2] 李凤霞, 周慧琴, 徐阳春. 宁夏灌区甜菜优化灌溉制度的研究[J]. 中国农业气象, 1998, 19(5): 1–3
Li F X, Zhou H Q, Xu Y C. Research on optimal irrigation system of sugarbeet in Ningxia Irrigation District[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 1998, 19(5): 1–3
[3] 杨传杰, 罗毅, 孙林, 等. 水分胁迫对覆膜滴灌棉花根系活力和叶片生理的影响[J]. 干旱区研究, 2012, 29(5): 802–810
Yang C J, Luo Y, Sun L, et al. Effect of water stress on root vigor and leaf physiology of cotton under mulch drip irrigation[J]. Arid Zone Research, 2012, 29(5): 802–810
[4] 刘涛, 李柱, 安沙舟, 等. 干旱胁迫对木地肤幼苗生理生化特性的影响[J]. 干旱区研究, 2008, 25(2): 231–235
Liu T, Li Z, An S Z, et al. Effects of drought stress on

physiological and biochemical properties of *Kochia prostrata* (L.) Schrad. seedlings[J]. Arid Zone Research, 2008, 25(2): 231–235

[5] Ha S, Vankova R, Yamaguchi-Shinozaki K, et al. Cytokinins: Metabolism and function in plant adaptation to environmental stresses[J]. Trends in Plant Science, 2012, 17(3): 172–179

[6] 马守臣, 张绪成, 段爱旺, 等. 施肥对冬小麦的水分调亏灌溉效应的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 139–143
Ma S C, Zhang X C, Duan A W, et al. Regulated deficit irrigation effect of winter wheat under different fertilization treatments[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(6): 139–143

[7] 赵丽英, 邓西平, 山仑. 水分亏缺下作物补偿效应类型及机制研究概述[J]. 应用生态学报, 2004, 15(3): 523–526
Zhao L Y, Deng X P, Shan L. A review on types and mechanisms of compensation effect of crops under water deficit[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(3): 523–526

[8] 芮海英, 王丽娜, 金铃, 等. 苗期干旱胁迫对不同大豆品种叶片保护酶活性及丙二醛含量的影响[J]. 大豆科学, 2013, 32(5): 647–649
Rui H Y, Wang L N, Jin L, et al. Effect of drought stress at seedling on protective enzyme activity and MDA content of different soybeans[J]. Soybean Science, 2013, 32(5): 647–649

[9] 高雁, 娄恺, 李春. 盐分胁迫下棉花幼苗对外源甜菜碱的生理响应[J]. 农业工程学报, 2011, 27(S): 244–248
Gao Y, Lou K, Li C. Effect of exogenous glycine betaine on the physiological responses of cotton seedlings under salt stress[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(S): 244–248

[10] 刘帆, 申双和, 李永秀, 等. 不同生育期水分胁迫对玉米光合特性的影响[J]. 气象科学, 2013, 33(4): 378–383
Liu F, Shen S H, Li Y X, et al. Effect of water stress on maize photosynthetic characteristics in different growth stages[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2013, 33(4): 378–383

[11] 王雨歌, 孟祥云, 彭思明, 等. 水分胁迫对枣叶片光合作用和保护酶活性的影响[J]. 石河子大学学报: 自然科学版, 2014, 32(1): 28–31
Wang Y G, Meng X Y, Peng S M, et al. Effects of water stress on photosynthetic characteristics and antioxidant enzyme activities of jujube leaves in Southern Xinjiang[J]. Journal of Shihezi University: Natural Science, 2014, 32(1): 28–31

[12] 李阳阳, 耿青云, 费聪, 等. 滴灌甜菜叶丛生长期对干旱胁迫的生理响应[J]. 应用生态学报, 2016, 27(1): 201–206
Li Y Y, Geng Q Y, Fei C, et al. Physiological responses of sugar beet (*Beta vulgaris*) to drought stress during vegetative development period under drip irrigation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(1): 201–206

[13] 韩占江, 于振文, 王东, 等. 调亏灌溉对冬小麦耗水特性和水分利用效率的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(11): 2671–2677
Han Z J, Yu Z W, Wang D, et al. Effects of regulated deficit irrigation on water consumption characteristics and water use efficiency of winter wheat[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(11): 2671–2677

[14] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000
Li H S. Principles and Techniques of Plant Physiological and Biochemical Experiment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000

[15] 张志良, 瞿卫菁. 植物生理学实验指导[M]. 第 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2003
Zhang Z L, Qu W J. Experiment Guide of Plant Physiology[M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2003

[16] 王丁, 姚健, 杨雪, 等. 干旱胁迫条件下 6 种喀斯特主要造林树种苗木叶片水势及吸水潜能变化[J]. 生态学报, 2011, 31(8): 2216–2226
Wang D, Yao J, Yang X, et al. Changes of leaf water potential and water absorption potential capacities of six kinds of seedlings in Karst mount area under different drought stress intensities: Taking six forestation seedlings in Karst mountainous region for example[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(8): 2216–2226

[17] 陈彦云, 万新伏, 王登科, 等. 半干旱区甜菜灌水的研究[J]. 中国甜菜糖业, 1995(6): 12–14
Chen Y Y, Wan X F, Wang D K, et al. Irrigation research of sugar beet in semiarid region[J]. China Beet & Sugar, 1995(6): 12–14

[18] 林凤, 王维成, 樊华, 等. 水氮互作对膜下滴灌甜菜产质量的影响[J]. 石河子大学学报: 自然科学版, 2013, 31(4): 418–424
Lin F, Wang W C, Fan H, et al. Effects of water and nitrogen interaction on the yield and quality of sugar beet with mulch drip irrigation[J]. Journal of Shihezi University: Natural Science, 2013, 31(4): 418–424

[19] Flexas J, Medrano H. Drought-inhibition of photosynthesis in C_3 plants: Stomatal and non-stomatal limitations revisited[J]. Annals of Botany, 2002, 89(2): 183–189

[20] 陈平, 孟平, 张劲松, 等. 两种药用植物生长和水分利用效率对干旱胁迫的响应[J]. 应用生态学报, 2014, 25(5): 1300–1306
Chen P, Meng P, Zhang J S, et al. Effects of drought stress on growth and water use efficiency of two medicinal plants[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(5): 1300–1306

[21] 石喜, 王密侠, 姚雅琴, 等. 水分亏缺对玉米植株干物质累积、水分利用效率及生理指标的影响[J]. 干旱区研究, 2009, 26(3): 396–400
Shi X, Wang M X, Yao Y Q, et al. Effects of water deficit on dry matter accumulation, WUE and physiological indexes of maize[J]. Arid Zone Research, 2009, 26(3): 396–400

[22] Rouhi V, Samson R, Lemeur R, et al. Photosynthetic gas exchange characteristics in three different almond species during

drought stress and subsequent recovery[J]. Environmental and Experimental Botany, 2007, 59(2): 117–129

[23] 王利彬, 祖伟, 董守坤, 等. 干旱程度及时期对复水后大豆生长和代谢补偿效应的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(11): 150–156
Wang L B, Zu W, Dong S K, et al. Effects of drought stresses and times on compensation effect after re-watering in soybean[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(11): 150–156

[24] 孟兆江, 刘安能, 庞鸿宾, 等. 夏玉米调亏灌溉的生理机制与指标研究[J]. 农业工程学报, 1998, 14(4): 88–92
Meng Z J, Liu A N, Pang H B, et al. Studied on physiological mechanism and indices of regulated deficit irrigation in summer maize[J]. Transactions of the CSAE, 1998, 14(4): 88–92

[25] 王婷, 海梅荣, 罗海琴, 等. 水分胁迫对马铃薯光合生理特性和产量的影响[J]. 云南农业大学学报, 2010, 25(5): 737–742
Wang T, Hai M R, Luo H Q, et al. Effect of water stress on leaf photosynthetic characteristics and yield of potato[J]. Journal of Yunnan Agricultural University, 2010, 25(5): 737–742